

**19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

Offenlegungsschrift
DE 199 60 370 A 1

Int. Cl.⁷:
G 01 K 11/00
G 01 K 11/12

- (21) Aktenzeichen: 199 60 370.7
 (22) Anmeldetag: 14. 12. 1999
 (43) Offenlegungstag: 5. 7. 2001

- (71) Anmelder:**
RUBITEC Gesellschaft für Innovation und
Technologie der Ruhr-Universität Bochum mbH,
44801 Bochum, DE
- (74) Vertreter:**
Schneiders & Behrendt Rechts- und Patentanwälte,
44787 Bochum

- (72) Erfinder:**
Schweiger, Gustav, Prof.Dr., 47057 Duisburg, DE;
Janetta, Frank, Dipl.-Ing., 46238 Bottrop, DE

- ⑤⑥ **Entgegenhaltungen:**

DE	40 34 237 A1
CH	6 79 427 A5
GB	21 91 286 A
GB	21 61 931 A
US	47 10 033

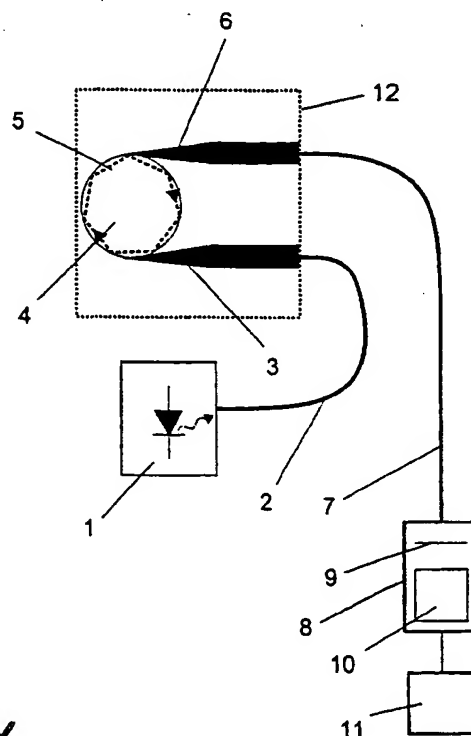
JP 5-196512 (A) in Pat. Abstr. of Jp., Sut. P,
Vol. 17(1993), No. 619 (P-1644);
JP 02-1 08 932 (A) in Patents Abstracts of
Japan, Sect. P, Vol. 14 (1990), No. 329 (P-1076);

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

- ⑤④ Optischer Temperatursensor

- (57) Die Erfindung betrifft einen faseroptischen Temperatursensor, bei dem als optischer Resonator ein vorzugsweise sphärischer Mikropartikel mit einem Durchmesser im Bereich von weniger als 100 Mikrometern verwendet wird. Der Mikropartikel steht mit Lichtwellenleitern zur Lichtein- bzw. -auskopplung in Verbindung. Der Lichtleiter kann auch durch einen freien Lichtstrahl ersetzt werden. Durch eine Laserdioden (1) werden in dem Mikropartikel optische Resonanzen angeregt, deren Wellenlängen vom Durchmesser und Brechungsindex der Mikropartikel abhängen. Bedingt durch thermische Ausdehnung hängen diese wiederum von der Temperatur ab. Durch eine Kalibrierung kann den Resonanzwellenlängen dann eine Temperatur zugeordnet werden.



DE 199 60 370 A 1

BEST AVAILABLE COPY

DE 199 60 370 A 1

Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft einen Temperatursensor mit einem optischen Resonator, der mit einem oder mehreren Lichtwellenleitern in Verbindung steht.

Eine ganze Reihe von unterschiedlichen Temperatursensoren sind bekannt und finden zum Teil breite Anwendung. So zum Beispiel Thermowiderstände, bei denen ein temperaturabhängiger ohmscher Widerstand zur Temperaturbestimmung verwendet wird, oder Thermoelemente, die aus zwei unterschiedlichen Metallen bestehen, deren Kontaktspannung temperaturabhängig ist. Die vorbekannten Temperatursensoren haben den Nachteil, daß sie in Umgebungen mit starken elektromagnetischen Störfeldern nicht zuverlässig arbeiten. Zudem können die Meßwerte durch die elektrischen Eigenschaften der Zuleitungen verfälscht werden.

Die DE 197 38 651 offenbart einen faseroptischen Temperatursensor, bei dem die optische Faser zwischen zwei Folien eingebettet ist. Bei der Temperaturmessung wird die Temperaturabhängigkeit der optischen Eigenschaften von Glas ausgenutzt. Der eigentliche Thermosensor ist hier also die Glasfaser selber. Der vorbekannte Temperatursensor ist geeignet für die Messung der Oberflächentemperatur eines Objektes. Der Sensor verfügt über eine mehrere Quadratzentimeter große Meßfläche, über welche die Oberflächentemperatur gemittelt wird. Dadurch wird die Verwendbarkeit des vorbekannten Temperatursensors auf die großflächige Messung von Oberflächentemperaturen eingeschränkt.

Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen hochauflösenden Temperatursensor zu schaffen, der über extrem kleine geometrische Abmessungen verfügt und so Temperaturmessungen auch an schwer zugänglichen Stellen mit einer hohen räumlichen Auflösung gestattet. Dabei soll der Temperatursensor unabhängig von elektromagnetischen Störfeldern zuverlässig funktionieren.

Diese Aufgabe wird bei einem Temperatursensor der eingangs genannten Art dadurch gelöst, daß als optischer Resonator ein Mikropartikel verwendet wird, wobei über die Enden der Lichtwellenleiter, die zu dünnen Spitzen ausgeformt sind, einerseits das Licht einer Laserdioden in den Mikropartikel eingekoppelt wird und andererseits zur Auswertung mittels eines optischen Spektrometers das Licht aus dem Mikropartikel ausgekoppelt wird.

In dem erfindungsgemäßen Mikropartikel entstehen optische Resonanzen bei Lichtwellenlängen, die von seiner geometrischen Form, seinem Brechungsindex und seinen Abmessungen abhängen. Dabei wird das Licht an der inneren Oberfläche des Mikropartikels mehrfach total-reflektiert. Kommt es bei dieser Vielfachreflexion zu einer phasenrichtigen Überlagerung der Wellenzüge des elektromagnetischen Feldes, so spricht man von optischer Resonanz. Hierbei entsteht eine Überhöhung der elektromagnetischen Feldamplitude im Inneren des Mikropartikels. Bei der Totalreflexion, die beim Übergang vom optisch dichteren Medium des Mikropartikels zur optisch dünneren Umgebung stattfindet, sind die Verluste gering, so daß sich auf diese Weise ein Resonator mit besonders hoher Güte realisieren läßt. Dies führt zur Ausbildung von ausgeprägten, schmalbandigen Resonanzen bei charakteristischen Wellenlängen.

Bedingt durch den thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Materials, aus dem der erfindungsgemäße Mikropartikel gefertigt wird, hängen die Resonanzeigenschaften des optischen Resonators von der Temperatur der Umgebung ab, in der er sich befindet. Die Temperatur des Resonators ändert sowohl dessen Größe als auch dessen Brechungsindex. Die Resonanzeigenschaften des Resonators werden dadurch in einem durch die Wahl des Resonatormaterials und der Reso-

natorgröße und -form vorhersehbaren Weise verändert.

Für die Anregung der Resonanzen wird gemäß der Erfindung das Licht einer Laserdioden verwendet. Diese hat den Vorteil, daß sie als preiswertes Bauteil frei im Handel verfügbar ist und daß sich durch sie eine geeignete breitbandige kohärente Anregungsstrahlung erzeugen läßt.

Die Verwendung des erfindungsgemäßen Mikropartikels als Temperatursensor ist in der Praxis nur dann möglich, wenn die Lichtübertragung zum Resonator störsticher ist, und die Lichteinkopplung in den Resonator gleichzeitig mit geringen Verlusten erfolgt. Diese Anforderungen werden durch die Verwendung von Lichtwellenleitern für die Übertragung des Lichtes erfüllt. Gleichzeitig gestatten die flexiblen optischen Fasern, den Temperatursensor an schwer zugängliche Orte zu verbringen.

Zur Messung der Temperatur ist es notwendig, die Wellenlängen der angeregten Resonanzen zu bestimmen. Hierzu wird das Licht wiederum mittels eines Lichtwellenleiters aus dem optischen Resonator ausgekoppelt und einem geeigneten Spektrometer zugeführt.

Mikropartikel, die für die Verwendung als Temperatursensor gemäß der Erfindung geeignet sind, haben Durchmesser von 100 Mikrometern und weniger. Zur Lichtein- bzw. auskopplung sind handelsübliche Lichtleiterfasern mit einem Durchmesser von 80 bis 125 Mikrometer ungeeignet. Aus diesem Grunde werden die mit dem optischen Resonator in Verbindung stehenden Enden der Lichtwellenleiter zu dünnen Spitzen geformt, so daß sich die Fasern bis auf wenige Mikrometer verjüngen. In Experimenten hat sich gezeigt, daß die genannten Faserspitzen über eine ideale Abstrahlcharakteristik für die Lichteinkopplung in den optischen Resonator verfügen. Entsprechendes gilt natürlich auch bei der Lichtauskopplung, die zur spektroskopischen Untersuchung der Resonanzen nötig ist. Die geringen Abmessungen des erfindungsgemäßen Mikropartikels in Verbindung mit den genannten vorteilhaften Eigenschaften der verwendeten Lichtwellenleiter führt dazu, daß der Temperatursensor in besonders hohem Maße der zugrundeliegenden Aufgabenstellung gerecht wird.

Zweckmäßigerweise wird der Mikroresonator aus einem UV-härtenden Polymerwerkstoff hergestellt. Dabei wird zunächst ein fluides Ausgangsmaterial, dessen Viskosität durch den Zusatz von leichtflüchtigem Lösungsmittel herabgesetzt sein kann, zu feinen Tröpfchen zerstäubt. Durch UV-Bestrahlung wird eine schnelle Polymerisationsreaktion initiiert, wodurch die Tröpfchen innerhalb kürzester Zeit zu den gewünschten Photopolymer-Mikropartikeln aushärten. Die nach diesem Verfahren hergestellten Mikropartikel haben eine beinahe ideale sphärische Form mit Durchmessern im Bereich von 10 bis 100 Mikrometern. Des weiteren hat der Photopolymerwerkstoff für die Verwendung als Mikroresonator ideale optische Eigenschaften. Das Material ist homogen und transparent, was eine wichtige Voraussetzung für einen Resonator hoher Güte ist. Der Brechungsindex liegt zwischen 1,5 und 1,6. Somit läßt sich ohne Probleme Totalreflexion an der inneren Oberfläche der Mikropartikel erreichen.

Soll der Temperatursensor zur Messung von Temperaturen von mehreren hundert Grad verwendet werden, so ist das zuvor genannten Photopolymer ungeeignet. In diesem Fall sollten zweckmäßigerweise Mikropartikel aus hochtemperaturfesten optischen Materialien wie zum Beispiel Quarzglas verwendet werden. Dieses Material weist ebenfalls einen hohen Brechungsindex auf und hält ohne weiteres Temperaturen bis zu 900°C stand.

Wie zuvor beschrieben, werden zur Temperaturmessung die Wellenlängen der auftretenden optischen Resonanzen ermittelt. Um eine bestimmte Resonanz anregen zu können,

BEST AVAILABLE COPY

muß zunächst Licht der entsprechenden Wellenlänge erzeugt werden. Dies kann entweder durch die Laserdiode geschehen, deren Emissionsspektrum geeignete Wellenlängen enthält, oder durch Fluoreszenzlicht, das erst im Mikropartikel entsteht. Hierzu ist das Ausgangsmaterial des Mikropartikels mit fluoreszierendem Farbstoff zu dotieren. Durch die Laserdiode wird der Farbstoff zur Fluoreszenz angeregt. Das breite Fluoreszenzspektrum des Farbstoffes ist dazu in der Lage, optische Resonanzen im Mikropartikel anzuregen. Diese können dann mittels des optischen Spektrometers detektiert werden. In der Praxis kommen die gängigen Fluoreszenzfarbstoffe in Frage. Deren begrenzte Lebensdauer ist allerdings von Nachteil. Die Verwendung von seltenen Erden, wie z. B. Neodym, wie es in Festkörperlasern verwendet wird, stellt eine Alternative dar.

Bei der Fertigung des erfindungsgemäßen Temperatursensors ergibt sich das Problem, daß der Mikroresonator mit den Lichtwellenleitern verbunden werden muß, ohne dabei die Resonanzeigenschaften wesentlich zu verschlechtern. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, hierfür einen Photopolymer-Klebstoff zu verwenden. Es handelt sich um ein ähnliches Material, wie es auch, wie zuvor beschrieben, für die Herstellung des Mikropartikels verwendet werden kann. Zunächst werden die Spitzenenden der Lichtwellenleiter an dem Mikropartikel in die gewünschte Position gebracht. Die Verbindungsstellen werden mit dem flüssigen Photopolymer benetzt und durch UV-Bestrahlung ausgehärtet. Es ist vorteilhaft, für den Klebstoff ein Photopolymer auszuwählen, dessen Brechungsindex kleiner ist, als derjenige des optischen Resonators. Dies ist Voraussetzung dafür, daß Totalreflexion im Inneren des Mikropartikels stattfinden kann.

Bei dem erfindungsgemäßen optischen Resonator ist es für den praktischen Einsatz als Temperatursensor vorteilhaft, wenn sich die auftretenden optischen Resonanzen mittels des optischen Spektrometers problemlos auflösen und voneinander trennen lassen. Bei der Verwendung von sichtbarem Licht zur Anregung der Resonanzen ist dies gegeben, wenn der sphärische Mikropartikel einen Durchmesser von weniger als 100 Mikrometern hat.

Experimente haben gezeigt, daß durch tangential-einkopplung am Umfangsrand der Kugel die optischen Resonanzen besonders effektiv angeregt werden können.

Für die eigentliche Temperaturmessung wird den Resonanzwellenlängen im optischen Spektrum eine Temperatur zugeordnet. Für sphärische Mikropartikel existiert zwar eine exakte Theorie, die gestatten würde, von dem optischen Spektrum auf den Partikeldurchmesser zurückzuschließen. In der Praxis hat es sich allerdings bewährt, für die Temperaturmessung eine Kalibrierung durchzuführen. Dabei wird das Resonanzspektrum des optischen Resonators bei verschiedenen, genau bekannten Temperaturen aufgenommen. Die eigentliche Temperaturmessung mittels des erfindungsgemäßen Temperatursensors erfolgt dann durch Interpolation zwischen den für die Kalibrierung verwendeten Temperaturwerten.

Es ist zweckmäßig, die Laserdiode so zu betreiben, daß das Anregungslicht eine spektrale Breite aufweist, die dem spektralen Abstand von Resonanzen gleicher Ordnung entspricht. Dies kann mit herkömmlichen Laserdioden erreicht werden, wenn sie unterhalb der Laserschwelle betrieben werden.

Da das Resonanzspektrum des optischen Resonators durch die Form des Mikropartikels bestimmt wird, reagiert der Temperatursensor äußerst empfindlich auf Kräfteinwirkungen, die den Mikropartikel auch nur minimal verformen. Für den praktischen Einsatz als Temperatursensor unter rauen Bedingungen ist es also zweckmäßig, den Mikropartikel in einer mechanisch stabilen Hülle anzuordnen. Hierzu eig-

net sich beispielsweise eine stabile Glaskapillare, die den Mikropartikel mitsamt den Lichtwellenleitern aufnimmt. Zur Wärmeleitung kann die Glaskapillare mit einer Flüssigkeit gefüllt werden, deren Brechungsindex kleiner sein muß derjenige des Mikropartikels.

Die der Erfindung zugrundeliegende Aufgabenstellung kann bei einem Temperatursensor der eingangs genannten Art auch dadurch gelöst werden, daß als optischer Resonator ein Mikropartikel verwendet wird, in den das Licht einer Laserdiode mittels einer Linse kontaktlos eingekoppelt wird, wobei das am Mikropartikel gestreute Licht mittels eines optischen Spektrometers ausgewertet wird.

Diese Anordnung hat den Vorteil, daß die Temperaturmessung berührungsfrei erfolgt. Dies kann insbesondere bei hochpräzisen Messungen wichtig sein, bei denen jede Wärmeleitung, die das Meßergebnis verfälschen würde, ausgeschlossen werden soll. Mittels einer Linse wird das Licht der Laserdiode so fokussiert, daß eine Resonanz im Mikropartikel angeregt werden kann. Das Streulicht wird isotrop in alle Raumrichtungen abgestrahlt und kann auf einfache Weise – ebenfalls kontaktlos – spektroskopiert werden.

Ausführungsbeispiele der erfindungsgemäßen Temperatursensoren werden im Folgenden anhand der Figuren erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 Ausführungsbeispiel eines faseroptischen Temperatursensors;

Fig. 2 kontaktloser Temperatursensor.

In der Fig. 1 wird das Licht einer Laserdiode 1 über einen Lichtwellenleiter 2, dessen Ende zu einer konischen Spitze 3 geformt ist, in einen sphärischen Mikropartikel 4 tangential eingekoppelt. Es bildet sich durch mehrfache Totalreflexion an der inneren Grenzfläche des Mikropartikels 4 eine Oberflächenresonanz aus, deren Strahlengang durch die gestrichelte Linie 5 angedeutet ist. Zur Auskopplung des Lichtes befindet sich an der gegenüberliegenden Seite des Mikropartikels 4 die Spitze 6 eines weiteren Lichtwellenleiters 7. Das ausgekoppelte Licht wird in einem optischen Spektrometer 8, das aus einem Beugungsgitter 9 und einer CCD-Kamera 10 besteht, spektroskopiert. Das Resonanzspektrum wird mittels einer Auswertungs Elektronik 11 in einen Temperaturwert umgerechnet. Durch das gestrichelte Quadrat 12 wird angedeutet, daß die Faserspitzen 3 und 6 sowie der Mikropartikel 4 überproportional vergrößert dargestellt sind. Der Durchmesser des Mikropartikels 4 beträgt etwa 30 Mikrometer; die Faserspitzen 3 und 6 verjüngen sich bis auf etwa 1 Mikrometer.

Die Fig. 2 zeigt den Strahlengang 13 des von der Laserdiode 1 emittierten Lichtes, das durch eine Linse 14 auf den Mikropartikel 4 tangential fokussiert wird. Durch dieses Licht werden die temperaturabhängigen optischen Resonanzen angeregt. Das Streulicht 15 wird durch eine weitere Linse 16 auf das optische Spektrometer 8 abgebildet. Dieses besteht, wie zuvor, aus einem Beugungsgitter 9 und der CCD-Kamera 10. Das gemessene Spektrum wird durch eine Auswertungs Elektronik 11 in einen Temperaturwert umgerechnet.

Patentansprüche

1. Temperatursensor mit einem optischen Resonator, der mit einem oder mehreren Lichtwellenleitern (2, 7) in Verbindung steht, **dadurch gekennzeichnet**, daß als optischer Resonator ein Mikropartikel (4) verwendet wird, wobei über die Enden der Lichtwellenleiter (2, 7), die zu dünnen Spitzen (3, 6) ausgeformt sind, einerseits das Licht einer Laserdiode (1) in den Mikropartikel (4) eingekoppelt wird und andererseits zur Auswertung mittels eines optischen Spektrometers (8) das

Licht aus dem Mikropartikel (4) ausgekoppelt wird.

2. Temperatursensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Mikropartikel (4) aus einem Polymermaterial besteht, das unter UV-Licht aushärtet.

3. Temperatursensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Mikropartikel (4) aus einem temperaturbeständigen Polymermaterial besteht.

4. Temperatursensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Mikropartikel (4) aus Quarzglas besteht.

5. Temperatursensor nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das Ausgangsmaterial des Mikropartikels (4) mit fluoreszierendem Farbstoff dotiert ist.

6. Temperatursensor nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die spitzen Enden (3, 6) der Lichtwellenleiter (2, 7) mit dem Mikropartikel (4) verklebt sind, wobei der Brechungsindex des Klebstoffes kleiner ist, als derjenige des Mikropartikels (4).

7. Temperatursensor nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Mikropartikel (4) sphärisch ist und einen Durchmesser von weniger als 100 Mikrometer hat.

8. Temperatursensor nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß das Licht aus dem Wellenleiter (2) tangential in den sphärischen Mikropartikel eingekoppelt wird.

9. Temperatursensor nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die mittels des optischen Spektrometers (8) ermittelten Resonanzwellenlängen durch eine Kalibrierung einem Temperaturwert zugeordnet werden.

10. Temperatursensor nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserdiode (1) so betrieben wird, daß sie Licht mit einer spektralen Breite emittiert, die etwa dem spektralen Abstand zweier Resonanzen gleicher Ordnung entspricht.

11. Temperatursensor nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß der Mikropartikel (4) in einer mechanisch stabilen Hülle angeordnet ist.

12. Temperatursensor mit einem optischen Resonator, dadurch gekennzeichnet, daß als optischer Resonator ein Mikropartikel (4) verwendet wird, in den das Licht einer Laserdiode (1) mittels einer Linse (14) kontaktlos eingekoppelt wird, wobei das am Mikropartikel (4) gestreute Licht mittels eines optischen Spektrometers (8) ausgewertet wird.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

50

55

60

65

BEST AVAILABLE COPY

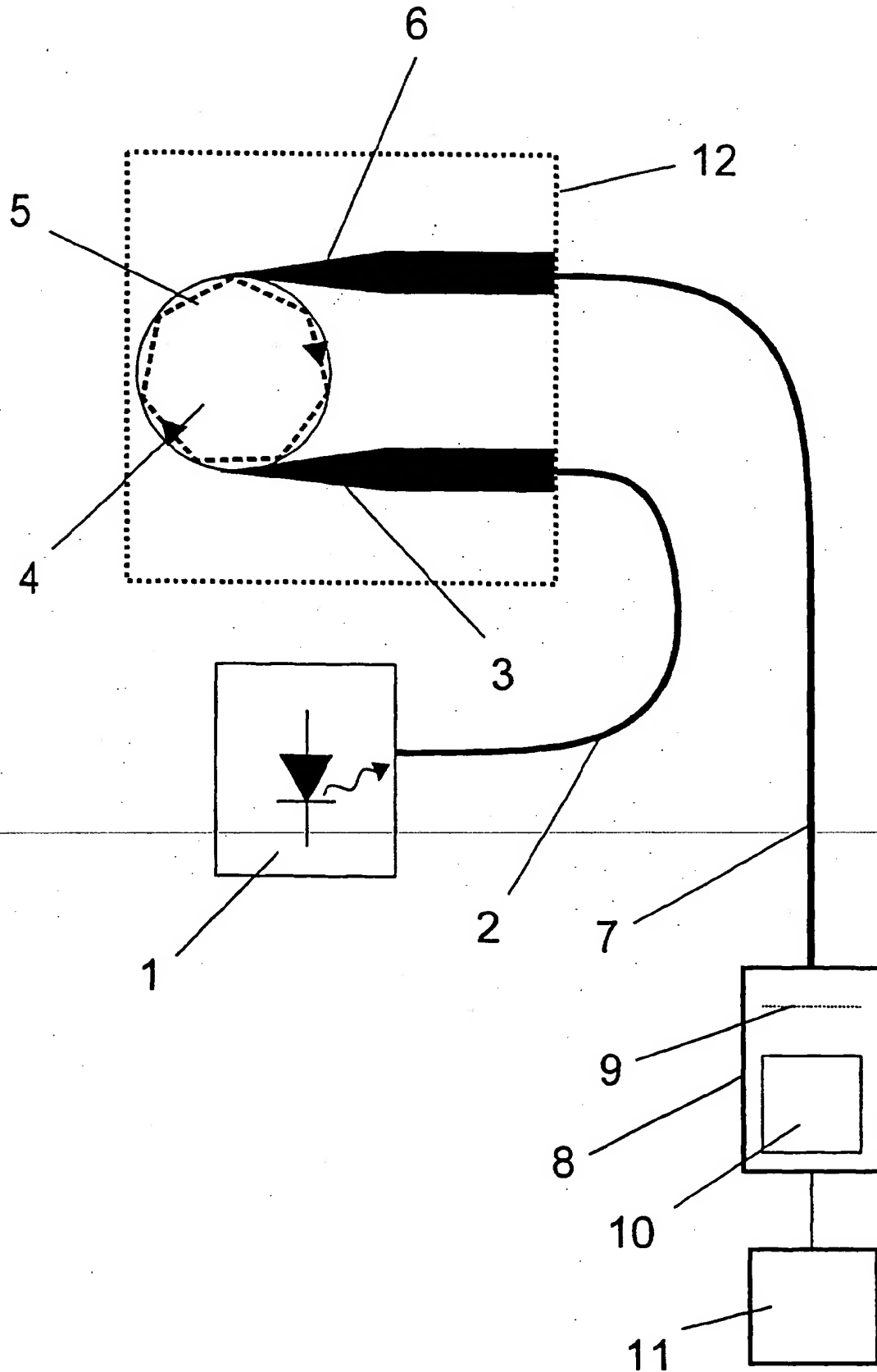


Fig. 1

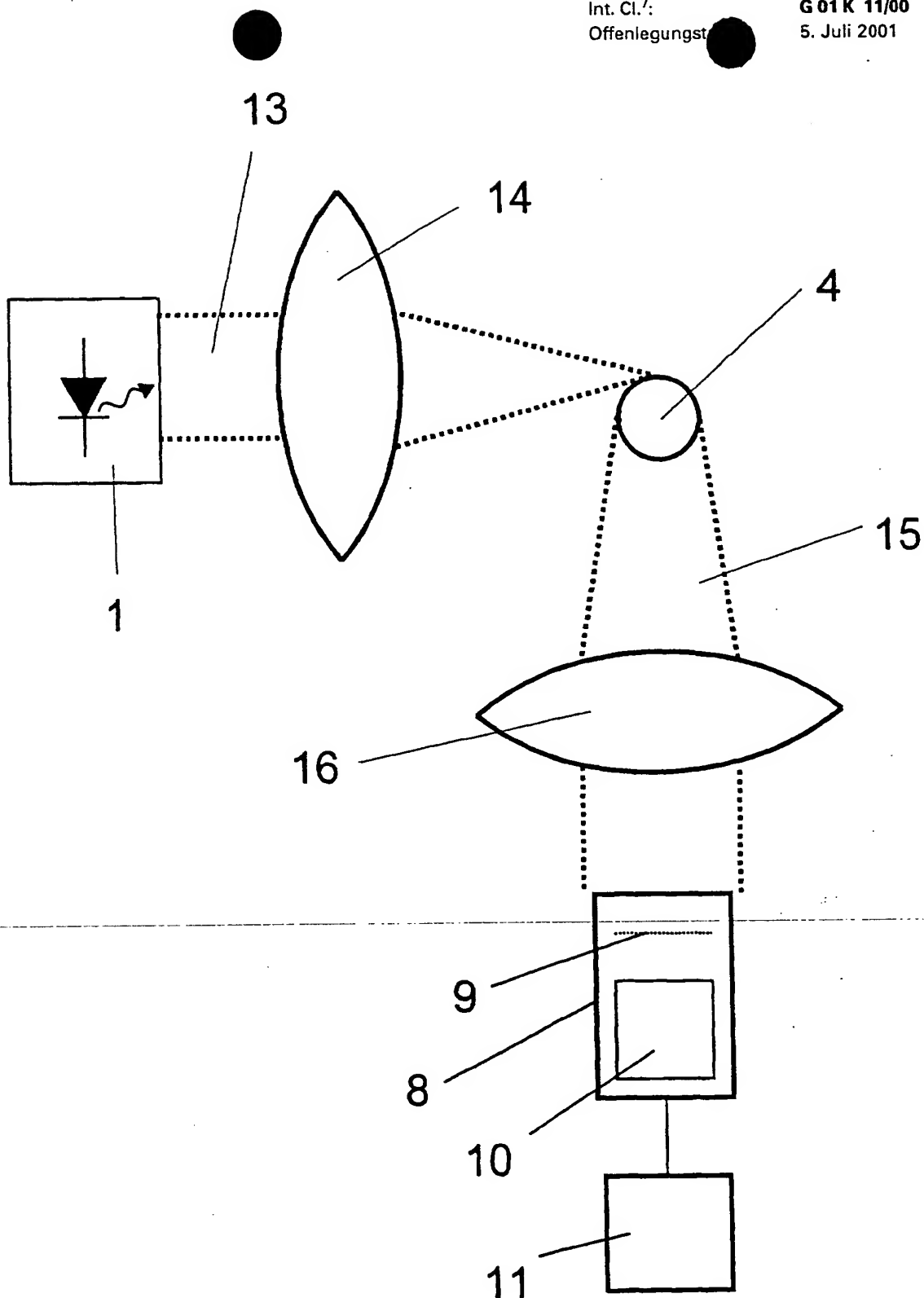


Fig. 2

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.

THIS PAGE BLANK (USPTO)